

На правах рукописи

Вальнев Владислав Владимирович



**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ И РЕМОНТОМ
ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

*Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Котелева Наталья Ивановна

Официальные оппоненты:

Темкин Игорь Олегович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС», кафедра автоматизированных систем управления, заведующий кафедрой;

Каплун Дмитрий Ильич

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра автоматики и процессов управления, доцент;

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова», г. Грозный.

Защита диссертации состоится **23 июня 2025 г. в 13:30** на заседании диссертационного совета ГУ.12 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д.2, **аудитория № 1171а**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 апреля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВА
Наталья Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Устойчивая и надежная эксплуатация технологических и производственных процессов является важной задачей для предприятий топливно-энергетического и минерально-сырьевого комплексов. Однако сегодня они сталкиваются с высоким уровнем износа технологической инфраструктуры, который в среднем по отраслям промышленности превышает 50%, что приводит к длительным простоям оборудования, внеплановым ремонтам и, соответственно, значительным убыткам. Поэтому процесс технического обслуживания и ремонта (ТОиР) промышленного оборудования является особенно важным, от сроков и качества выполнения которого во многом зависит эффективность работы промышленных предприятий. Для автоматизации процесса управления ТОиР промышленного оборудования известны автоматизированные системы управления ТОиР (АСУ ТОиР), которые выполняют широкий спектр функций: планирование ТОиР, диагностику и контроль технического состояния оборудования, управление материально-техническими активами, учет затрат на выполнение ТОиР.

Однако непосредственно контроль процесса ТОиР в ремонтной зоне в подобных системах управления не рассматривается. Таким образом, информация о выполненных действиях по ТОиР поступает в информационные системы предприятия только на основе внесенных вручную актов и отчетов, заполнение которых без участия человека невозможно. Следовательно, дальнейшее повышение эффективности производственных процессов в управлении ТОиР требует поиска новых способов и алгоритмов, обеспечивающих автоматический контроль выполненных действий по ТОиР промышленного оборудования. Поэтому разработка новых средств автоматизации для процессов ТОиР представляет собой актуальную научную задачу, решение которой позволит снизить влияние человеческого фактора при учете выполненных производственных работ и обеспечить автоматический контроль технологии и времени работы, а интегрирование в структуру АСУ ТП и АСУП может создать решение для информационного сопровождения жизненного цикла промышленного оборудования.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в решение проблем управления ТОиР внесли многие ученые, среди которых Абрамович Б.Н., Козярук А.Е., Назарычев А.Н., Воропай Н.И., Ковалёв Г.Ф., Волошин А.А., Жуковский Ю.Л.

Вопросы автоматизации и повышения эффективности производственных процессов на отечественных предприятиях рассмотрены в работах Белоглазова И.Н., Педро А.А., Харазова В.Г., Мышляева Л.П., Бажина В.Ю., Минцаева М.Ш. и других ученых.

Исследование методов машинного обучения, компьютерного зрения и на их основе решение задачи идентификации процессов в широкой степени освещены в работах Афанасьева В.О., Осипова Г.С., Бухановского А.В., Кульчицкого А.А., Годяева А.И., Rotman D., Mohd Noor H., C. Arora, Glowacz A.

Однако в настоящее время недостаточно исследований, которые бы решали актуальные задачи идентификации производственных процессов для управления техническим обслуживанием и ремонтом промышленного оборудования.

Объект исследования – процесс технического обслуживания ремонта промышленного оборудования.

Предмет исследования – методы идентификации производственных процессов технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования.

Цель работы – повышение эффективности управления производственными процессами за счет автоматического контроля выполнения ТОиР промышленного оборудования.

Идея работы. Для достижения поставленной цели необходимо разработать программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий идентификацию производственных процессов ТОиР промышленного оборудования, для которой необходимо осуществлять контроль действий человека на основе анализа набора признаков, полученных за счет обработки видеопотока, содержащего движение его рук.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Провести анализ научно-технических проблем в области управления техническим обслуживанием и ремонтом промышленного оборудования.

2. Изучить существующие методы идентификации действий человека при выполнении ТОиР промышленного оборудования.

3. Разработать и экспериментально обосновать алгоритм идентификации производственных процессов ТОиР промышленного оборудования.

4. Разработать программно-аппаратный комплекс для интегрирования в структуру АСУ ТОиР промышленного оборудования.

5. Оценить технико-экономические показатели эффективности применения программно-аппаратного комплекса в структуре АСУ ТОиР промышленного оборудования.

Научная новизна:

1. Предложен алгоритм идентификации производственных процессов ТОиР промышленного оборудования, включающий в себя набор признаков, который позволяет классифицировать действия человека на основе анализа видеопотока, содержащего движение его рук.

2. Введены три группы признаков, позволяющие описать перемещение рук в видеопотоке, и установлена зависимость временной и частотно-временной области признаков от выполняемого человеком действия во время ТОиР.

3. Предложена архитектура АСУ ТОиР промышленного оборудования для автоматического контроля действий по ТОиР, выполняемых для устранения дефектов, возникающих во время эксплуатации оборудования.

Соответствие паспорту специальности:

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами:

п.8 Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников.

п.11 Методы создания, эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая базы данных и методы их оптимизации, промышленный интернет вещей, облачные сервисы, удаленную диагностику и мониторинг технологического оборудования, информационное сопровождение жизненного цикла изделия.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработан алгоритм идентификации процессов технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования, позволяющий распознавать действия человека во время выполнения производственных процессов (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680169).

2. Предложен способ повышения эффективности управления производственным процессом за счет своевременного устранения брака во время выполнения ТОиР промышленного оборудования на основе идентификации действий сотрудника.

3. Обоснованы требования к вычислительным ресурсам программно-аппаратного комплекса для реализации модели машинного обучения на основе предложенного алгоритма, связанные с необходимостью использования многопоточных вычислений на видеокarte для идентификации действий человека в режиме реального времени.

4. Предложено решение по интеграции программно-аппаратного комплекса на основе алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР в структуру АСУ ТП и АСУП для информационного сопровождения жизненного цикла промышленного оборудования.

5. Результаты диссертационного исследования реализованы в виде программно-аппаратного комплекса и используются в производственном процессе, что подтверждается актами о внедрении в АО «Хакель» (акт внедрения от 03.12.2024) и АО «СоюзЦМА» (акт внедрения от 20.03.2024).

Методология и методы исследования. Результаты диссертационной работы получены с использованием алгоритмов компьютерного зрения, методов построения моделей машинного обучения и теории анализа временных рядов. Разработка программно-аппаратного

комплекса выполнена на языке программирования Python, сбор и хранение данных реализовано в базе данных PostgreSQL.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм обработки видеопотока, основанный на контроле перемещения рук человека, позволяет идентифицировать производственные процессы технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования с точностью не менее 86 %.

2. Внедрение программно-аппаратного комплекса на основе алгоритма идентификации производственных процессов в структуру АСУ ТОиР позволяет автоматизировать контроль процессов ТОиР и сократить сроки выявления брака.

Степень достоверности результатов исследования основана на применении известных и общепризнанных теорий и методов обработки изображений и анализа временных рядов и подтверждена результатами экспериментальных исследований на лабораторных стендах образовательного центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и промышленными испытаниями на производственной линии сборки устройств защиты от импульсных перенапряжений АО «Хакель». Работа выполнялась в рамках НИР «Цифровой тренажер промышленных процессов в рамках концепции Индустрия 4.0» ПАО «НК «Роснефть» по договору № НИ-35-808-21 от 23.04.2021.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы представлены на всероссийских и международных конференциях. За последние 3 года принято участие в 12 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 9 международных: Международный (май 2022 года) и всероссийский (декабрь 2024 года) форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург); 76-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и Газ – 2022» (апрель 2022 года, г. Москва); Международный семинар «Новые средства и системы автоматизации в горно-обогатительном производстве, металлургии и экологии» (октябрь 2022 года, октябрь 2024 года, г. Москва); XXXI Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2023» (февраль 2023 года, г. Москва); 16-ая Международная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы

освоения недр в XXI веке глазами молодых.» (октябрь 2023 года, г. Москва); 66-я Всероссийская научная конференция МФТИ (апрель 2024 года, г. Москва); XIII Конгресс молодых ученых ИТМО (апрель 2024 года, г. Санкт-Петербург); Международная научно-техническая конференция «Автоматизация, энергетика и машиностроение: технологии и инновации» (май 2024 года, г. Грозный); Международная конференция «Трудноизвлекаемые запасы нефти» (сентябрь 2024 года, г. Альметьевск); Международная научно-практическая конференция «Транспорт. Взгляд в будущее» (ноябрь 2024 года, г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, формулировке научных положений, проведении анализа отечественной и зарубежной научной литературы, разработке алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР промышленного оборудования, проведении лабораторных и промышленных экспериментов. На основе алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР промышленного оборудования автором разработано программное обеспечение для автоматического контроля действий ТОиР промышленного оборудования, выполнена оценка требований к вычислительным ресурсам аппаратного обеспечения, проведены расчеты экономической эффективности применения разработанного программно-аппаратного комплекса.

Публикации. Результаты диссертационного исследования освещены в 14 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 4 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 185 наименований, и 3 приложений. Диссертация изложена

на 146 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка и 23 таблицы.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю доценту кафедры автоматизации технологических процессов и производств Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II Котелевой Наталье Ивановне за поддержку и помощь в проведении научных исследований и формировании главной идеи диссертационной работы, коллективу образовательного центра цифровых технологий и выпускающей кафедре автоматизации технологических процессов и производств Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за всестороннюю поддержку при подготовке диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы научно-технические проблемы в области управления ТОиР промышленного оборудования, рассмотрена эволюция стратегий выполнения технического обслуживания и ремонта, приведено описание функциональных возможностей и ограничений АСУ ТОиР, показано сравнение интеллектуальных систем поддержки принятия решений при выполнении ТОиР промышленного оборудования.

Во второй главе представлен научный обзор методов идентификации действий человека, обоснован выбор метода анализа видеопотока для идентификации действий человека, выполняющего ТОиР, приведено описание алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР, введены формулы расчета набора признаков, обоснован выбор временных и частотно-временных характеристик для набора признаков, изложены формулы оценки качества классификации для моделей машинного обучения.

В третьей главе представлено экспериментальное обоснование алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР. Выполнено сравнение точности классификации действий человека различными моделями машинного обучения в

лабораторных условиях при ТОиР центробежного насоса и распределительного электрического щита. Раскрыты результаты промышленных испытаний, отражена и доказана высокая точность классификации действий, выполняемых на линии сборки устройств защиты от импульсных перенапряжений. Показано сравнение точности классификации действий по ТОиР при использовании разных наборов признаков в алгоритме идентификации производственных процессов ТОиР при обучении моделей машинного обучения. Выполнено сравнение разработанного алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР с существующими алгоритмами обработки видеопотока для классификации действий человека.

В четвертой главе предложен способ оценки показателей эффективности ТОиР на основе разработанного программного обеспечения. Приведена сравнительная оценка требований к аппаратному обеспечению, включая оценку необходимых вычислительных ресурсов на примере сравнения времени вычислений на процессоре и видеокарте вычислительных устройств. Разработано архитектурное взаимодействие программно-аппаратного комплекса с информационными и производственными системами предприятия на уровне АСУ ТП и АСУП. Предложены рекомендации по автоматизации управления производственными процессами ТОиР на основе внедрения программно-аппаратного комплекса в структуру АСУ ТОиР.

В пятой главе представлено технико-экономическое обоснование эффективности применения программно-аппаратного комплекса. Приведена оценка капитальных и операционных затрат. Выполнены расчеты показателей экономической эффективности и создан календарный план внедрения предложенных решений.

Заключение отражает обобщенные выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решенными задачами.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Алгоритм обработки видеопотока, основанный на контроле перемещения рук человека, позволяет идентифицировать

производственные процессы технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования с точностью не менее 86 %.

Алгоритм идентификации производственных процессов ТОиР состоит из выполнения четырех этапов: анализ видеопотока, вычисление характерного набора признаков, обработка набора признаков во временной и частотно-временной области, классификация признаков моделью машинного обучения (рисунок 1).

Первым этапом выполняется обработка видеопотока на основе двух предобученных нейронных сетей. Первая нейронная сеть выполняет поиск рук и возвращает часть изображения, на которой они присутствуют, вторая нейронная сеть определяет ключевые точки руки в найденной части изображения. Затем координаты по оси X и Y ключевых точек рук сохраняются для последующей обработки.

На втором этапе для полученных координат, представляющих 84 временных ряда (42 для левой и правой руки, где 21 параметр для координат по оси X и еще 21 параметр для координат по оси Y), рассчитываются признаки, которые характеризуют изменение положения и перемещение рук в кадре видеопотока. В качестве набора признаков введены три группы: признаки расстояния, признаки углов и геометрические признаки. Признаки расстояния показывают геометрическое расстояние между ключевыми точками на каждом пальце руки. Признаки углов представляют собой углы треугольников, которые образуются между пальцами рук. Соединяя точку, расположенную на запястье руки, с точками на крайней фаланге пальцев, образуются четыре треугольника. Все углы треугольников являются искомыми признаками, которые рассчитываются по теореме косинусов. Геометрическим признаком является площадь геометрической фигуры, которую образует рука в кадре видеопотока. Определение площади геометрической фигуры заключается в разделении сначала на четырехугольники путем объединения ближайших ключевых точек, а затем полученные четырехугольники делятся на два треугольника. Площадь треугольника вычисляется по формуле Герона через полупериметр треугольников. Полученные площади треугольников складываются для определения площади четырехугольника и затем складываются площади четырехугольников, определяя площадь всей фигуры, которую образует рука.

Третьим этапом выполняется расчет параметров, которые охарактеризуют временные ряды набора признаков. Для описания временных рядов рассмотрена временная область, представляющая статистические параметры, а также частотно-временная область, представляющая собой вейвлет-преобразование временного ряда с последующим определением энтропии и энергии полученных коэффициентов. Выбор вейвлет-функции выполняется по наибольшему значению силуэт-коэффициента, который показывает качество группировки энтропии и энергии между тремя наборами признаков.

На четвертом этапе выполняется классификация полученного набора признаков моделью машинного обучения с целью идентификации действий человека, выполняющего ТОиР.

Проведены лабораторные и промышленный эксперименты для обоснования предложенного алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР. В лабораторных экспериментах выполнено ТОиР центробежного насоса и распределительного электрического щита, которое записано на видео. Для центробежного насоса выполнены действия, необходимые для замены уплотнительной прокладки, согласно инструкции по эксплуатации. В распределительном электрическом щите выполнялся монтаж и демонтаж коммуникационного устройства. Для каждого лабораторного оборудования эксперимент выполнен несколькими людьми при разных условиях: в перчатках и без них, с записью видео от первого и от третьего лица (рисунки 2 и 3). В результате обработки видеозаписей экспериментов предложенным алгоритмом, получены модели машинного обучения, классифицирующие действия по ТОиР с точностью не менее 86 %. Для моделей, получивших наилучший результат, приведены нормализованные матрицы ошибок, отражающие точность классификации по каждому классу (рисунки 4 и 5).

Промышленные испытания выполнены на производственной линии сборки устройств защиты от импульсных перенапряжений АО «Хакель». Проведена видеозапись работы сотрудника, выполняющего ручную сборку устройств на рабочем месте. Технология сборки устройств заключается в выполнении трех последовательных действий с предварительным нанесением маркировки на корпус

устройства (рисунок 6). На основе выполненных видеозаписей на рабочем месте сотрудника обучена модель машинного обучения, точность классификации которой составила 98 % (рисунок 7).

На основе лабораторных и промышленных экспериментов выполнено сравнение разработанного алгоритма идентификации производственных процессов ТООР с существующими алгоритмами обработки видеопотока для классификации действий человека. Результаты показали высокую эффективность предложенного алгоритма при классификации схожих действий, выполняемых человеком в рамках ТООР. При этом низкие показатели метрик точности у большинства известных алгоритмов обусловлены обучением классификации различных категорий действий, что ограничивает область их применения для разделения действий внутри одной категории (таблица 1).

Таким образом, экспериментально подтверждено, что разработанный алгоритм идентификации производственных процессов позволяет идентифицировать действия, которые выполняются вручную на основе анализа видеопотока, содержащего перемещения рук человека.

2. Внедрение программно-аппаратного комплекса на основе алгоритма идентификации производственных процессов в структуру АСУ ТООР позволяет автоматизировать контроль процессов ТООР и сократить сроки выявления брака.

Разработан программно-аппаратный комплекс, включающий программное обеспечение, основанное на алгоритме идентификации производственных процессов ТООР, и аппаратное обеспечение, представленное в виде вычислительного устройства с базой данных PostgreSQL. На рисунке 8 показан веб-интерфейс программно-аппаратного комплекса с результатами идентификации действий сотрудника во время сборки устройств защиты от импульсных перенапряжений.

В представленном веб-интерфейсе отображается видеопоток, содержащий работу сотрудника на рабочем месте, и график, показывающий действие, выполняемое в настоящий момент. По полученному графику выполняется оценка показателей эффективности производственных работ, а именно: оценка количества собранных устройств, продолжительность сборки каждого устройства, контроль

соблюдения технологии сборки устройств и выявление брака. Продолжительность сборки одного устройства определяется суммой времени выполнения каждого этапа сборки, основанных на технологии производства. В результате в конце смены составляется отчет о выполненной работе, содержащий количество собранных устройств с определением среднего времени сборки, а также выделением времени самой быстрой и самой медленной работы. На рисунке 9 показан отрезок времени, на котором нарушена технология сборки устройства, а именно устройство собрано без вставки стекла в деталь. Таким образом, получен брак, который выявляется только на этапе контроля качества выпускаемой продукции, однако использование разработанного решения позволяет еще на этапе производства определить брак и исправить устройство до передачи в отдел контроля качества.

Реализация программного обеспечения с моделями машинного обучения требует соответствующих аппаратных вычислительных способностей. Для этого проведена сравнительная оценка вычислительных устройств для обработки видеопотока на основе представленного алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР. Для оценки вычислительных ресурсов рассмотрены как стационарные персональные компьютеры, так и ноутбуки и микроконтроллер. Оценка проведена путем обработки одного видео, где в первом эксперименте обработка видеопотока выполнялась только на процессоре вычислительного устройства, а во втором эксперименте – только на видеокарте. Для выполнения эксперимента предложенный алгоритм был адаптирован для многопоточного вычисления на видеокарте. Эксперимент повторялся 20 раз для каждого вычислительного устройства. В результате обработки видеопотока оценивалась продолжительность обработки и частота обновления кадров в секунду. При оценке использовалось одинаковое видео продолжительностью 20 секунд. Результаты экспериментального исследования аппаратного обеспечения представлены на рисунке 10. Представленное распределение полученных значений позволяет сделать вывод о возможности применения разработанного программного обеспечения для работы в режиме реального времени. Для этого вычислительному устройству необходимо обрабатывать видеопоток со скоростью, пре-

вышающей скоростью поступающих кадров с видеокамеры. В проведенном эксперименте обрабатываемый видеопоток обновлялся с частотой 30 кадров в секунду, что является стандартной частотой обновления кадров для большинства видеокамер. Среди используемых в эксперименте вычислительных устройств для обработки видеопотока в режиме реального времени могут применяться все рассматриваемые вычислительные устройства, за исключением микроконтроллера при условии вычислений на видеокарте.

Разработанный программно-аппаратный комплекс может являться модульным решением в АСУ ТОиР. На рисунке 11 представлена схема взаимодействия разработанного программно-аппаратного комплекса с уровнями АСУ ТП и АСУП для информационного сопровождения жизненного цикла промышленного оборудования. Представленная схема состоит из двух частей. Первая часть схемы отражает применение информационных систем на уровнях АСУ ТП и АСУП для диагностики и контроля технического состояния технологического оборудования. На основе предложенной архитектуры контроль обнаружения дефектов в промышленном оборудовании позволяет в автоматическом режиме составлять заявку на ТОиР по фактическому состоянию оборудования, где разработанный программно-аппаратный комплекс, входящий в структуру АСУ ТОиР, используется для автоматического контроля составленных в заявке мероприятий ТОиР промышленного оборудования. Таким образом, при внедрении программно-аппаратного комплекса в структуру АСУ ТОиР возникновение несоответствий и отклонений в производственных работах ТОиР будут отмечены еще на этапе ремонта, что приведет к сокращению времени выявления ошибок.

На рисунке 12 представлена диаграмма Ганта, отражающая эффект от применения программно-аппаратного комплекса. Эффект предложенного решения заключается в сокращении сроков производственных процессов за счет своевременного обнаружения брака на производстве, а также автоматическому составлению текущей отчетности о выполненной работе.

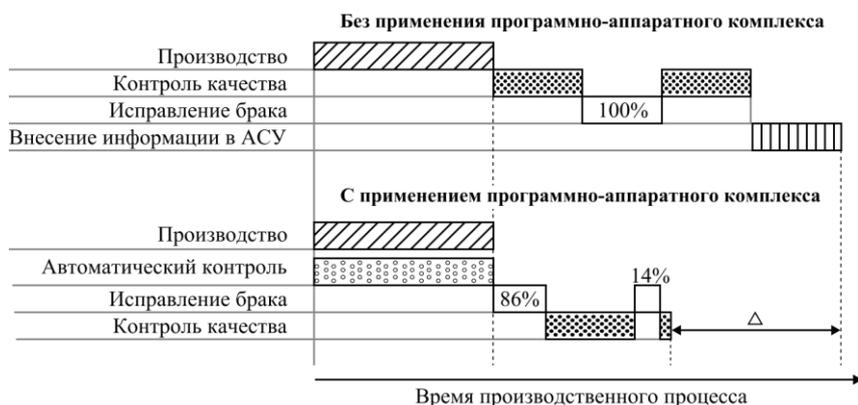


Рисунок 12 – Диаграмма Ганта, отражающая эффект от применения программно-аппаратного комплекса при автоматическом контроле производственных процессов

Без использования программно-аппаратного комплекса брак обнаруживается только после завершения производственных работ. На его устранение и повторную проверку уходит дополнительное время, так как исправляется 100 % дефектов. Применение программно-аппаратного комплекса позволяет осуществлять автоматический контроль выполняемых производственных работ и устранять появление брака на этапе производства. В предложенном алгоритме идентификации производственных процессов обучена модель машинного обучения, которая с точностью не менее 86 % распознает действия и может определить брак или отклонение в действиях сотрудника во время работы. Таким образом, можно считать, что неопознанный брак или погрешность работы программно-аппаратного комплекса возможна в 14 % случаев. Поэтому оставшаяся часть брака исправляется после проверки качества выполненных работ.

В случае выполнения производственных работ без брака на производстве эффект от внедрения программно-аппаратного комплекса заключается в автоматическом заполнении текущей отчетности о выполненных работах.

Оценка экономической эффективности проведена на основе промышленного эксперимента. Чистая приведенная стоимость (NPV) проекта к 2030 году составит почти 13,5 млн руб. Дисконтированный

срок окупаемости (DPP) проекта составляет 1,3 года, индекс доходности (PI) – 4,8, внутренняя норма доходности (IRR) составляет 160 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании представлено новое решение актуальной научно-технической задачи повышения эффективности управления производственными процессами за счет автоматического контроля процессов ТОиР промышленного оборудования

По результатам исследования сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. В результате анализа научно-технических проблем в области управления ТОиР выявлен низкий уровень квалификации сотрудников, выполняющих ТОиР, отсутствие решений для автоматического контроля процессов ТОиР, закрытые архитектуры АСУ ТОиР, что в совокупности определяет направления, развитие которых может обеспечить повышение эффективности в управлении и организации производственных процессов промышленного предприятия, а именно: разработка эффективных методов обучения с применением цифровых технологий дополненной реальности, развитие систем поддержки принятия решений для оперативного персонала с учетом изменений в стратегиях выполнения ТОиР в сторону предсказательного обслуживания, разработка средств автоматизации для контроля процессов ТОиР с целью обеспечения прозрачности в выполнении ремонтных работ промышленного оборудования.

2. Установлено, что методы идентификации действий человека на основе алгоритмов компьютерного зрения применимы в области технического обслуживания и ремонта оборудования при извлечении характерных признаков, основанных на движении рук человека.

3. Разработан алгоритм идентификации производственных процессов ТОиР промышленного оборудования, использующий модель машинного обучения, для которой экспериментально обоснован набор признаков, полученный на основе анализа видеопотока, содержащего движение рук человека.

4. Разработан программно-аппаратный комплекс, на основе которого предложено решение для его интеграции в структуру

АСУ ТП и АСУП, что обеспечивает информационное сопровождение жизненного цикла промышленного оборудования, в том числе автоматический контроль процессов ТОиР, составляемых на основе оценки технического состояния при эксплуатации оборудования.

5. Рассчитаны показатели экономической эффективности применения программно-аппаратного комплекса для автоматизации управления ТОиР промышленного оборудования, основанные на результатах промышленных испытаний, которые доказывают повышение эффективности управления производством за счет снижения сроков выполнения производственных работ. Срок окупаемости составил 1,3 года, NPV через 6 лет составит почти 13,5 млн руб. при начальных инвестициях в 3,5 млн руб.

Представленные технические решения в диссертационном исследовании имеют практическое применение в производственной деятельности и могут быть адаптированы к другим ручным операциям, отличным от приведенных в экспериментах.

Перспективным направлением развития темы исследования является изучение вопросов идентификации производственных процессов при выполнении ремонтных работ группой людей, находящихся в одном кадре видеокamеры, разработка методов и алгоритмов для идентификации объектов, с которыми взаимодействует человек во время ТОиР оборудования, что может позволить создать цифровой двойник процесса ремонта оборудования на основе действий сотрудника с целью применения в информационных системах поддержки принятия решений.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Вальнев, В.В.** К вопросу об автоматизации технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования / **В.В. Вальнев, Н.И. Котелева** // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 5-2. – С. 276-283. DOI: 10.17513/snt.40040.

2. **Вальнев, В.В.** Новый подход к автоматизации технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования / **В.В. Вальнев, Н.И. Котелева, Д.Н. Суворов** // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2024. – Т. 20. – № 1 (35). – С. 34-48. DOI: 10.26200/GSTOU.2024.63.96.004.

Публикации в изданиях, входящие в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Koteleva, N. Automatic Detection of Maintenance Scenarios for Equipment and Control Systems in Industry / N. Koteleva, **V. Valnev** // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – № 24 (12997). DOI: 10.3390/app132412997.

4. Koteleva, N.I. Augmented reality as a means of metallurgical equipment servicing / N.I. Koteleva, **V.V. Valnev**, N.A. Korolev // Tsvetnye Metally. – 2023. – № 4. – P. 14-23. DOI: 10.17580/tsm.-2023.04.02.

5. Koteleva, N. Investigation of the Effectiveness of an Augmented Reality and a Dynamic Simulation System Collaboration in Oil Pump Maintenance / N. Koteleva, **V. Valnev**, I. Frenkel // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – № 1 (350). DOI: 10.3390/app12010350.

6. Koteleva, N. Augmented Reality System and Maintenance of Oil Pumps / N. Koteleva, G. Buslaev, **V. Valnev**, A. Kunshin. // International Journal of Engineering. – 2020. – Vol. 33. – № 8. P. 1620-1628. DOI: 10.5829/ije.2020.33.08b.20.

Публикации в прочих изданиях:

7. Koteleva, N.I. Augmented reality technology as a tool to improve the efficiency of maintenance and analytics of the operation of electromechanical equipment / N.I. Koteleva, Y.L. Zhukovskiy, **V. Valnev** // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1753. – № 1. – P. 012058.

8. Koteleva, N. Augmented reality system and maintenance of electromechanical equipment in industrial production / N. Koteleva, K. Bekenev, **V. Valnev** // Youth Technical Sessions Proceedings-Proceedings of the 6th Youth Forum of the World Petroleum Council-Future Leaders Forum. – 2019. – P. 156-163.

9. **Вальнев, В.В.** Система мониторинга и контроля производственных процессов обслуживания и ремонта оборудования АСУТП / **В.В. Вальнев**, Н.И. Котелева // Сборник тезисов XIII Конгресса молодых ученых ИТМО, Санкт-Петербург, 09–11 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», 2024. – С. 67-68.

10. Котелева, Н.И. Программный сервис для автоматизации работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования

промышленных предприятий / Н.И. Котелева, **В.В. Вальнев** // Материалы трудов Международной конференции «Трудноизвлекаемые запасы нефти», Альметьевск, 23–24 сентября 2024 года. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2024. – С. 238-240.

11. **Вальнев, В.В.** Программный сервис по обслуживанию и ремонту оборудования на основе дополненной реальности / **В.В. Вальнев**, Н.И. Котелева // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: Сборник материалов, Москва, 23–27 октября 2023 года. – Москва: ИПКОН РАН, 2023.– С. 262-265.

12. **Вальнев, В.В.** Исследование эффективности совместного применения системы дополненной реальности и систем динамического моделирования при выполнении технического обслуживания нефтяных насосов // Тезисы докладов 76-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2022». – Москва, 25–29 апреля 2022 года: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2022. – Т. 2. – С. 188-189.

13. **Вальнев, В.В.** Применение дополненной реальности и динамического моделирования для проведения технического обслуживания и ремонта нефтяных насосов // Тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования». – Санкт-Петербург, 15–20 мая 2022 года: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – Т. 2. – С. 347-349.

14. **Вальнев, В.В.** Применение системы дополненной реальности для технического обслуживания и ремонта насосов // Тезисы докладов XVIII Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования». – Санкт-Петербург, 15–17 апреля 2020 года: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. – С. 272-273.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680169 Российская Федерация. Программа обнаружения действий персонала, осуществляющего сервисное и оперативное обслуживание АСУТП. Заявка № 2023668862: заявл. 14.09.2023; опубл. 27.09.2023 / Н.И. Котелева, **В.В. Вальнев**; заявитель «Санкт-Петербургский горный университет».– 1 с.: ил.

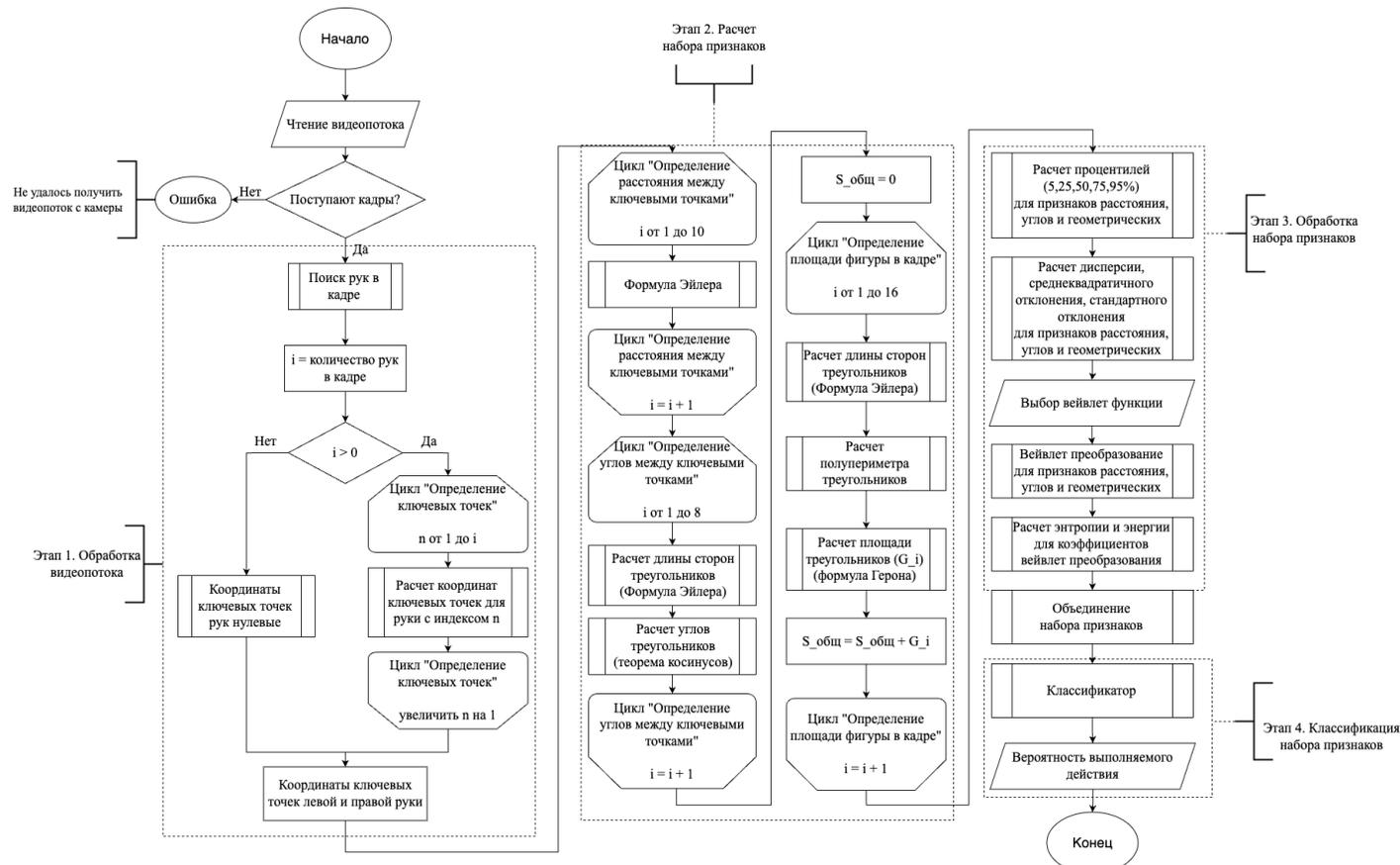


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР промышленного оборудования

Таблица 1 – Результаты сравнения разработанного алгоритма идентификации производственных процессов ТОиР с существующими алгоритмами обработки видеопотока для классификации действий человека

Алгоритм	ТОиР центробежного насоса			ТОиР электрического щита			Сборка УЗИП		
	Метрика точности классификации			Метрика точности классификации			Метрика точности классификации		
	Accuracy	F1-мера	ROC AUC	Accuracy	F1-мера	ROC AUC	Accuracy	F1-мера	ROC AUC
Разработанный	0,93	0,93	0,99	0,87	0,87	0,94	0,98	0,98	1,00
X3D	0,79	0,79	0,95	0,93	0,93	1,00	0,98	0,98	0,99
SlowFast	0,67	0,66	0,85	0,93	0,93	0,99	0,96	0,96	0,99
I3D	0,71	0,69	0,87	0,93	0,92	0,99	0,98	0,98	0,99
ST-GCN	0,22	0,22	0,66	0,63	0,53	0,94	0,62	0,58	0,92
Videomae	0,42	0,38	0,64	0,63	0,62	0,89	0,69	0,68	0,86
Vivit	0,33	0,30	0,46	0,07	0,19	0,39	0,73	0,73	0,94
Timesformer	0,34	0,35	0,43	0,09	0,06	0,60	0,22	0,11	0,54



Рисунок 2 – Выполнение ТОиР центробежного насоса в лабораторном эксперименте

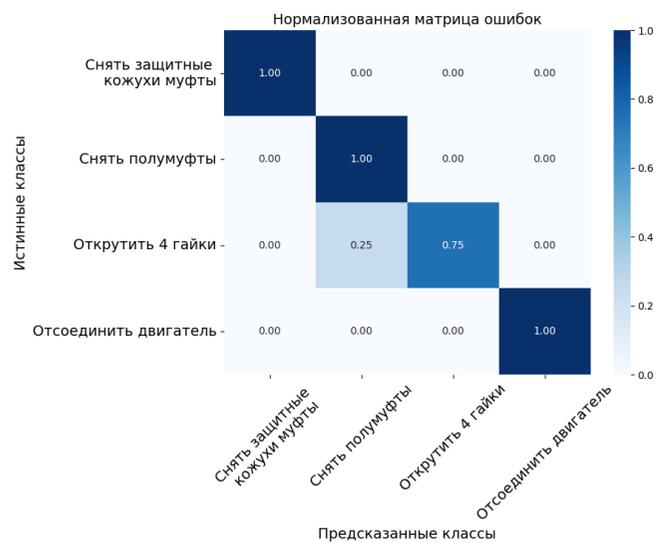


Рисунок 4 – Точность классификации действий по ТОиР центробежного насоса



Рисунок 3 – Выполнение ТОиР распределительного электрического щита в лабораторном эксперименте

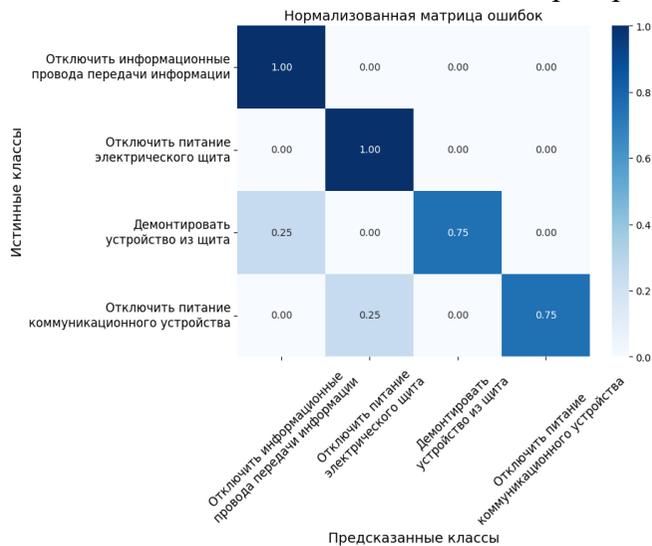


Рисунок 5 – Точность классификации действий по ТОиР электрического щита

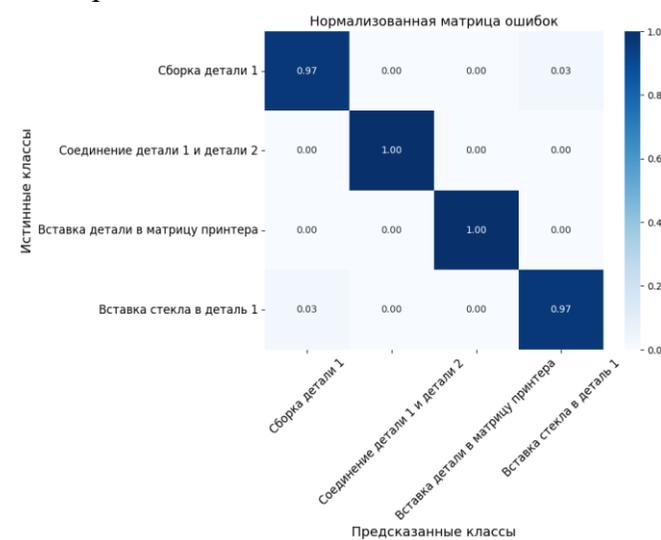


Рисунок 7 – Точность классификации действий по сборке электротехнических устройств



Вставка стекла в деталь №1

Сборка детали №1

Соединение детали №1 и детали №2

Вставка детали в матрицу принтера

Рисунок 6 – Действия сотрудника при сборке электротехнических устройств защиты от импульсных перенапряжений (промышленный эксперимент)

Сборка устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП)

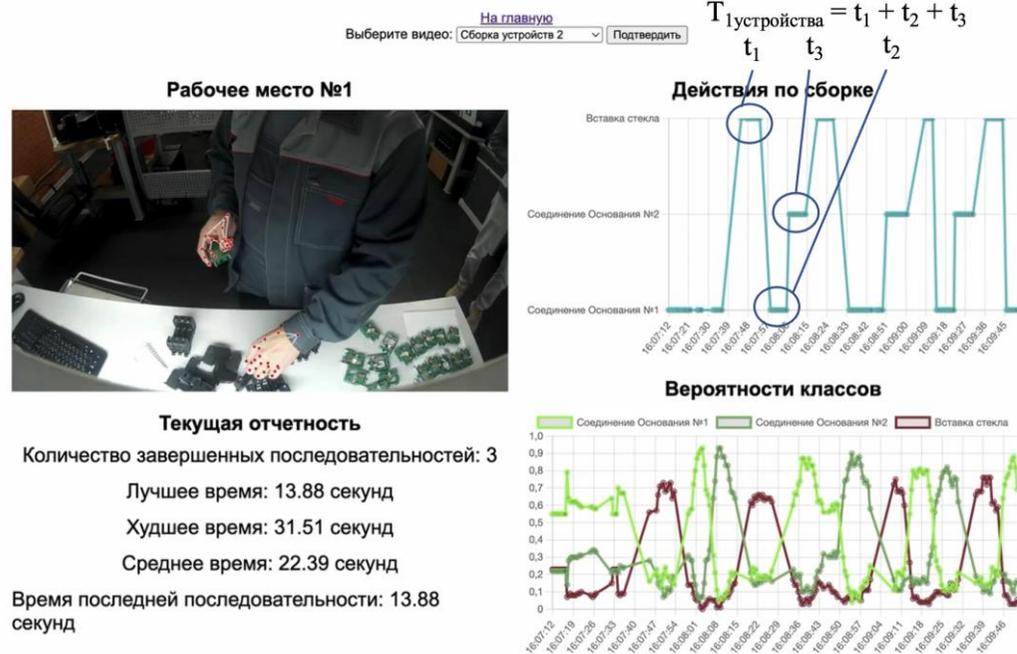


Рисунок 8 – Разработанный веб-интерфейс программно-аппаратного комплекса. Отображение текущих результатов производства

Сборка устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП)

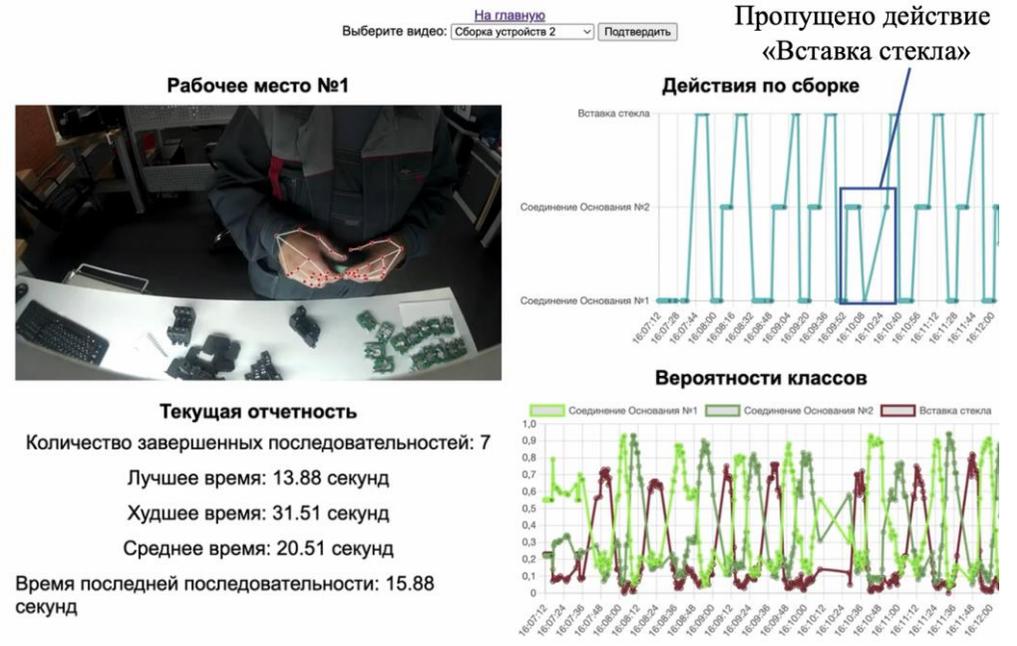


Рисунок 9 – Определение пропущенного действия в процессе сборки электротехнического устройства

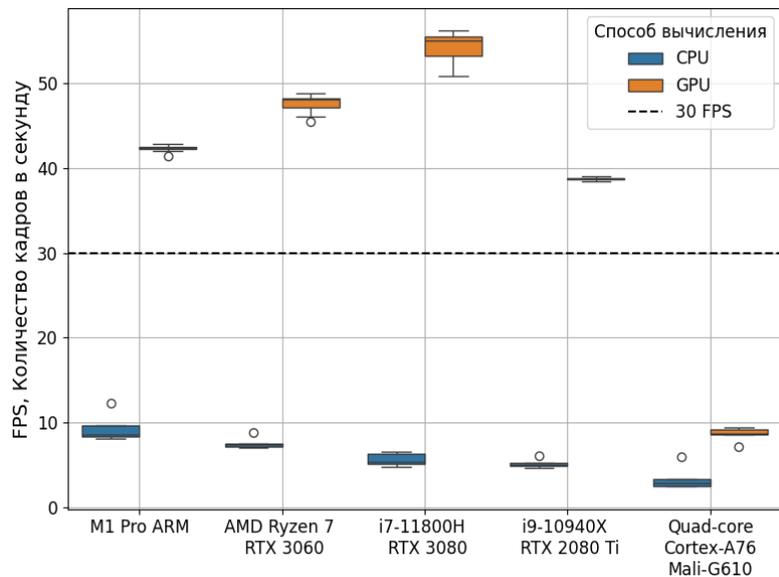
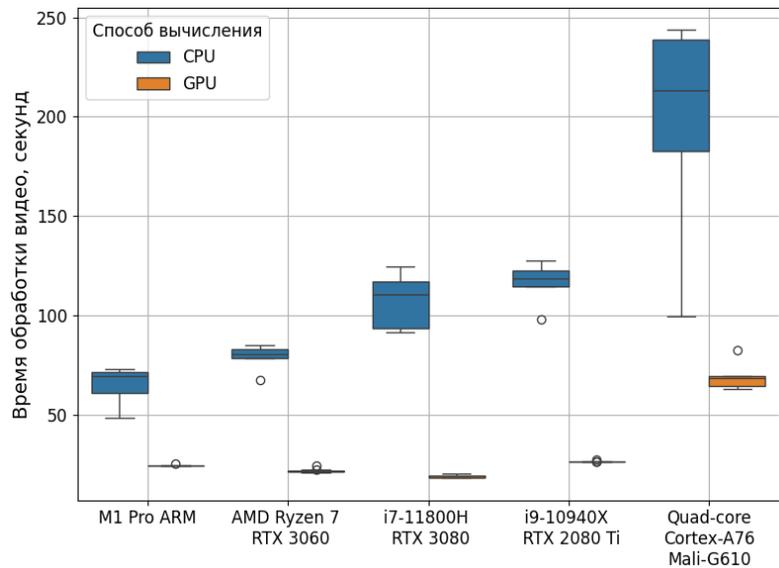


Рисунок 10 – Сравнение вычислительных ресурсов аппаратного обеспечения при обработке видеопотока предложенным алгоритмом

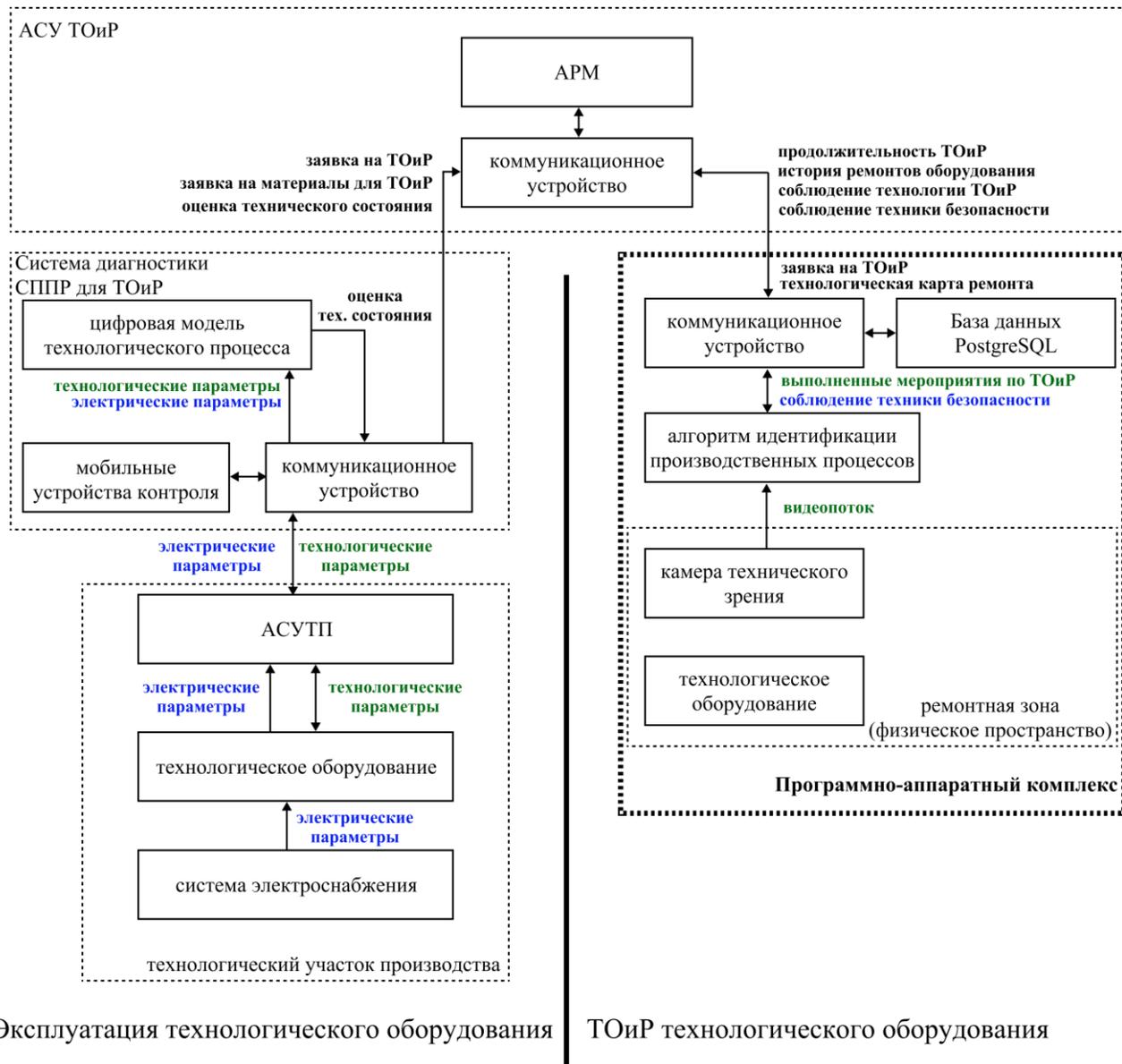


Рисунок 11 – Схема взаимодействия программно-аппаратного комплекса с уровнями АСУ ТП и АСУП для информационного сопровождения жизненного цикла промышленного оборудования